การศึกษาอัตราส่วนผสมและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

A STUDY ON CEMENT-BASED MIX DESIGN AND MECHANICAL PROPERTY TESTS FOR 3D-PRINTING

ชนม์วิชญ์ ธัญญะสุขวณิชย์[1], ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์[2] และ วิทิต ปานสุข[3,*]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ
*Corresponding author address: withit.p@chula.ac.th3

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน หนึ่งในความท้าทายของอุตสาหกรรมการก่อสร้างก็คือการลดต้นทุน โดยเฉพาะต้นทุนค่าวัสดุและต้นทุนค่าแรงที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นนวัตกรรมทางเลือกในการลดต้นทุนในการก่อสร้างโดยรวมลง เนื่องจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ช่วยเพิ่มความเร็วในกระบวนการก่อสร้าง ส่งผลให้มีการลดการใช้ทรัพยากรบุคคลในกระบวนการ นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณวัสดุที่อาจสูญเสียไปในกระบวนการก่อสร้าง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการก่อสร้างแบบเดิม อย่างไรก็ตามจะต้องมีการใช้ส่วนผสมสำหรับวัสดุในการพิมพ์ในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพในการก่อสร้างและการลดต้นทุน บทความวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการเสนอแนวทางการออกแบบส่วนผสมสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพเหมาะสม โดยการใช้วัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมพื้นฐานในการพิมพ์ โดยได้มีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ดังกล่าวในสภาวะสด (Fresh state) และสภาวะแข็งตัว (Hardened state) อาทิการทดสอบการไหล การทดสอบระยะเวลาในการก่อตัว และการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด อีกทั้งได้นำเสนอแนวทางในการทดสอบวัสดุสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติอีกด้วย

คำสำคัญ: *เครื่องพิมพ์ 3 มิติ, ปูนซีเมนต์, คุณสมบัติเชิงกล*

Abstract

Nowadays, one of the major challenges in a construction industry is cost reduction, which is mainly referring to labor cost and raw material cost. 3-D printers technology is introduced to the industry as an innovative alternative to achieve the goal. 3-D printers help accelerate construction speed which means decreasing human labor required in the process. They also consume less raw materials in comparison to conventional method since there were less material wasted during the process. However, the right proportion of materials in printing mix should be used to meet an optimum point between construction efficiency and cost reduction. The objective of this research is to offer alternatives in mix design which are effective and suitable for 3-D printers using cement-based mix. The mix in both fresh state and hardened state are tested for mechanical properties including flowability, setting time, and compressive strength. Furthermore, this research aims to offer guidelines in 3-D printing mix testing methods.

Keywords: *3-D Printer, Cement, Mechanical Properties*

1. บทนำ

ปัจจุบันธุรกิจด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้มีการขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้าง พัฒนา และปรับปรุงสิ่งก่อสร้างเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดความต้องการในการใช้ทรัพยากรเพื่อสิ่งก่อสร้างที่มากขึ้น ซึ่ง “ปูนซีเมนต์” เป็นหนึ่งในทรัพยากรที่สำคัญในการก่อสร้าง เนื่องจากปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติที่มีความทนทานสูง มีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างยาวนานและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

เนื่องจากความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมโครงสร้างพื้นฐานได้มีการประยุกต์โดยการนำเทคโนโลยีมาใช้ในงานก่อสร้างมากขึ้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3DPC) กำลังเป็นสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจมากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน โดยการศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบัน ในช่วงปี พ.ศ. 2556 นั้นมีแนวโน้มในการพัฒนาที่เพิ่มมากขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อเทียบกับช่วงที่ผ่านมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินี้เริ่มมีการพัฒนาและมีการวิจัยในการนำวิธีก่อสร้างแบบดั้งเดิมมาประยุกต์ใช้ในการผลิตโครงสร้างของคอนกรีตโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ [1] ทั้งนี้ในปัจจุบันยังไม่มีรูปแบบการใช้งานเทคโนโลยีการพิมพ์ 3มิติในการก่อสร้างที่ชัดเจน ทำให้มีการแข่งขันที่สูงยิ่งขึ้นในการเปิดเสรีทางด้านการออกแบบและการพัฒนาให้เกิดการใช้ทรัพยากรที่ทดแทนหรือการใช้ทรัพยากรที่น้อยลง [2]

ทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการก่อสร้างโดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินั้นยังมีข้อจำกัดและตัวแปรที่สำคัญทางด้านวัสดุของคอนกรีตที่ใช้ในการพิมพ์ งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญในการพัฒนาวัสดุส่วนผสมให้มีความเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ต้องมีความ

ข้นเหลวที่เหมาะสมให้สามารถไหลผ่านท่อและฉีดได้ โดยคอนกรีตที่ออกมาจากหัวฉีดจะต้องมีความสามารถอยู่ได้ด้วยตัวเองไม่เหลวจนเกินไป และระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้ในการแข็งตัวจะต้องมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของโครงสร้างและความเร็วในฉีดและการเคลื่อนตัวของหัวพิมพ์ โดยวัสดุคอนกรีตที่ใช้นั้นต้องมีกำลังรับแรงอัดที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกโครงสร้างคอนกรีตที่ฉีดขึ้นรูปในแต่ละชั้นของโครงสร้างได้ เพื่อให้วัสดุที่ขึ้นรูปในแต่ละชั้นมีการประสานกันอย่างสมบูรณ์ [3-4]

2. วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ส่วนที่ 1 สภาวะสด (Fresh state) [5] คือ การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมของสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในขณะที่ส่วนที่ 2 สภาวะแข็ง(Hardened state) [6] เป็นการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมที่ผ่านการทดลองในส่วนที่1 ให้มีความสามารถในการฉีดและขึ้นรูปสามารถคงสภาพและมีการเชื่อมประสานกันเป็นเนื้อเดียว สามารถรับน้ำหนักได้เหมาะสม

2.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัสดุหลักซึ่งประกอบไปด้วย (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลน (2) มวลรวมจากทรายธรรมชาติ (3) สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ให้มีความข้นเหลวที่เหมาะสมสำหรับการฉีด ให้มีเวลาในการก่อตัวที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป และให้กำลังอัดที่เหมาะสม โดยรายละเอียดรายละเอียดของวัสดุมีดังนี้

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลน ประเภท 1 ตราทีพที่มีการผลิตและใช้งานสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

มวลรวมละเอียดจากทรายธรรชาติที่นำมาใช้นั้นจะถูกนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทรายธรรมชาติที่ได้จะมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก มีสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C128 เพื่อนำไปปรับลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการคำนวณส่วนผสม และทำการทดสอบหาขนาดคละและขนาดที่ใหญ่ที่สุดของมวลรวมละเอียด เพื่อหาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus, F.M.) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C33 เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งมีคุณสมบัติจากการทดสอบตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

มวลรวม	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	ปริมาณน้ำส่วนเกิน (%)	โมดูลัสความละเอียด (FM)
ทรายธรรมชาติ	0.55	0.95	1.71

สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ให้มีความเหมาะสมสำหรับวัสดุเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกสารเคมีผสมเพิ่ม 3 ชนิด ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติมีดังนี้

สารเคมีผสมเพิ่มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl Methyl Cellulose, HPMC) เป็นสารผสมเพิ่มที่ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำและความหนืดของมอร์ตาร์ โดยลักษณะการทำงานของHPMC จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะกันของอนุภาคให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้การเคลื่อนย้ายของอนุภาคน้ำและการสญเสียของน้ำนั้นลดลง รวมไปถึงการชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ต้องควบคู่ไปกับการควบคุมปริมาณที่ใช้ ถ้ามากจนเกินไปจะส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ได้ไม่มีความเหลวที่เหมาะสม จะมีคุณสมบัติที่เหนียวเพียงอย่างเดียว เพื่อพัฒนาความสามารถในการกักเก็บน้ำความสามารถในการเท เพิ่มระยะเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ [7]

แป้งอีเทอร์ (Starch Ether) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์สด ให้มีความหนืดที่มากขึ้นและหน่วงระยะเวลาในการก่อตัว แต่แป้งอีเทอร์อาจจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานจนเกินไป รวมไปถึงมีความหนืดที่มากยิ่งขึ้น [8]

สารลดน้ำ (Superplasticizer, SP) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ ที่สามารถลดปริมาณการใช้น้ำในการออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ลงโดยที่ ไม่ลดความสามารถในการไหล และทำให้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์น้อยลงซึ่งส่งผลให้ กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีสัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลของมอร์ตาร์อาจส่งผลให้เกิดปัญหาการเยิ้มและการแยกของน้ำที่ชั้นของมอร์ตาร์ได้ โดยส่วนมากจึงมีการนิยมนำสารผสมเพิ่ม HPMC มาใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ [9] ในการปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.2. สัดส่วนผสมและวิธีการออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะคำนึงถึงความสามารถทำงานได้ (workability) ของมอร์ตาร์เป็นหลัก โดยปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาคือปริมาณของน้ำที่ใช้ต่อมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water cement ratio, W/C) รวมถึงการนำสารเคมีผสมเพิ่มมาพิจารณาเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์

โดยในส่วนของงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปจะมีการใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วนประมาณ 0.35 – 0.45 ซึ่งมีความสามารถในการไหลและกำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมกับการทำงานของโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป แต่สำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินั้นมีความสามารถในการไหลที่มากจนเกินไป จึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการไหลที่เหมาะสมเพื่อให้ฉีดขึ้นรูปได้ [3] โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ให้ลดลงเหลือ 0.28 และ 0.30 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษามอร์ตาร์ที่มีการนำสารเคมีผสมเพิ่มอันได้แก่ (1) HPMC (2) Starch Ether และ (3) Superplasticizer มาทำการทดสอบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ให้ เหมาะสมกับการนำไปใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และในส่วนการออกแบบอัตราส่วนผสมขั้นแรก โดยการเติมสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl Methyl Cellulose ,HPMC) และ แป้งอีเทอร์ (Starch Ether) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0.01 และ 0.03 โดยน้ำหนักของน้ำและสารลดน้ำ Superplasticizer ที่ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์โดยทำการผสมสารเคมีผสมเพิ่มกับน้ำ ผสมด้วยเครื่องผสมตามมาตรฐาน ASTM C305 ซึ่งสัดส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปดังตารางที่ 2 และทำการบ่มตัวอย่างโดยใช้พลาสติกห่อตัวอย่างขณะที่ตัวอย่างอยู่ในแบบหล่อ หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเพื่อบ่มต่อในอุณหภูมิห้องก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบหาคุณสมบัติในการรับแรงอัดต่อไป

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ [10]

ส่วนผสม	W/C	ซีเมนต์ (kg/m^3)	มวลรวม (kg/m3)	สารเคมีผสมเพิ่ม			น้ำ (kg/m3)
				HPMC (kg/m3)	Starch Ether (kg/m3)	SP (kg/m3)	
W400-28	0.28	1582	98	-	-	-	440
W400-28-H01		1582	98	0.04 (0.01%)	-	-	440
W400-28-H03		1582	98	0.13 (0.03%)	-	-	440
W400-28-E01		1582	98	-	0.04 (0.01%)	-	440
W400-28-E03		1582	98	-	0.13 (0.03%)	-	440
W350-28-H01		1491	242	0.04 (0.01%)	-	-	410
W300-28-H01		1384	410	0.04 (0.01%)	-	-	380
W170-28-H01S05		1003	1014	0.03 (0.01%)	-	5.02 (0.5%)	270
W400-30	0.30	1500	149	-	-	-	450
W400-30-H01		1500	149	0.04 (0.01%)	-	-	450
W400-30-H03		1500	149	0.13 (0.03%)	-	-	450
W400-30-E01		1500	149	-	0.04 (0.01%)	-	450
W400-30-E03		1500	149	-	0.13 (0.03%)	-	450

2.3. การทดสอบคุณสมบัติสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

สำหรับการทดสอบวัสดุสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะทำการทดสอบใน 2 สภาวะ คือ (1) สภาวะสด (Fresh state) ได้แก่ ความสามารถในการทำงานได้ และระยะเวลาในการก่อตัว (2) สภาวะแข็ง (Hardened state) ได้แก่ กำลังในการรับแรงอัด และความแข็งแรงระหว่างชั้น

2.3.1. ความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

การทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ โดยการทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow table) ตามมาตรฐาน ASTM C1437

2.3.2. ระยะเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์

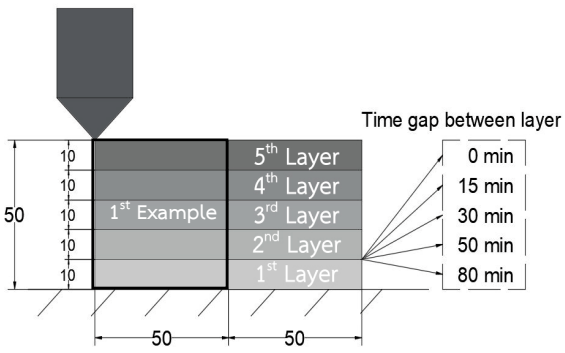
การทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ (Setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C807 เพื่อนำมาพิจารณาถึงความสามารถในการลำเลียงของมอร์ตาร์จากการฉีดขึ้นรูป ควบคู่ไปกับการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

2.3.3. กำลังในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 ซม. ที่บ่มในระยะเวลาที่ 7 วัน

2.3.4. ความแข็งแรงระหว่างชั้นของมอร์ตาร์

การทดสอบความแข็งแรงระหว่างชั้นของมอร์ตาร์นั้นผู้วิจัยได้ทำการฉีดขึ้นรูปตัวอย่างจากสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ที่กล่าวไว้ข้างต้น ด้วยขนาดความกว้าง 50 มม. ความยาว 50 มม. และความสูง 10 มม. ฉีดขึ้นรูปทั้งหมด 5 ชั้น จนมีความสูงที่ 50 มม. ที่ระยะห่างของเวลาที่ฉีดขึ้นรูปในแต่ละชั้นเท่ากันใน 1 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างจะกำหนดระยะเวลาที่แตกต่างกัน 5 ระยะเวลา ได้แก่ 0 15 30 50 และ 80 นาที แสดงดังรูปที่ 2 [11]

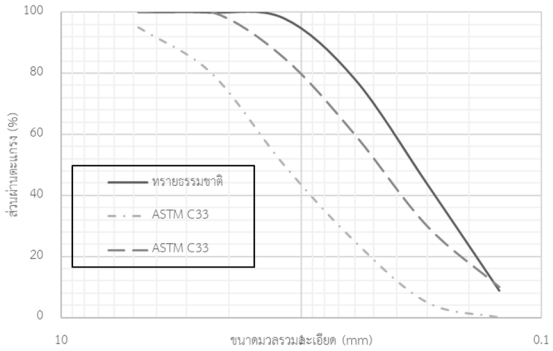


รูปที่ 2 ขนาดตัวอย่างและระยะเวลาที่ต่างกันแต่ละชั้น

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1. ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

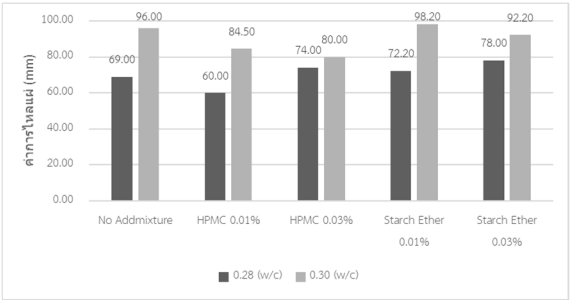
จากรูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดคละมวลรวมละเอียดตามมาตรฐานจากการทดสอบพบว่า ทรายธรรมชาติที่เลือกใช้มีขนาดคละที่ละเอียดกว่าขนาดคละที่ได้กำหนดส่วนของขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C33 ซึ่งในการผลิตมอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ต้องคำนึงถึงการลำเลียงมอร์ตาร์ผ่านท่อหรือหัวฉีดที่มีขนาดเล็กตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดคือขนาดระหว่าง 2.36 มิลลิเมตร (No. 8) ถึง 4.75 มิลลิเมตร (No. 4) รวมทั้งต้องการชิ้นงานที่มีความละเอียดจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่ามาตราฐาน



รูปที่ 3 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

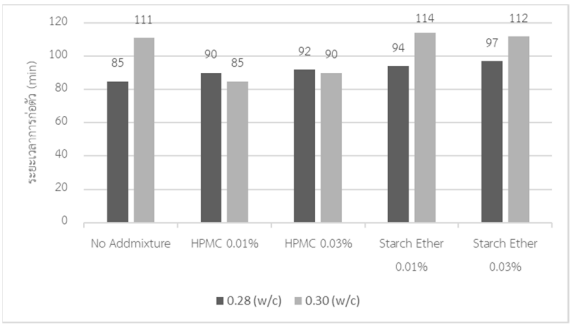
3.2. การทดสอบมอร์ตาร์ในสภาวะสด (FRESH STATE)

จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปริมาณน้ำที่ 400 กก./ลบ.ม ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.28 และ 0.30 โดยส่วนผสมของมอร์ตาร์มีส่วนผสมของสารเคมีผสมเพิ่ม HPMC และ Starch Ether ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.01 และ 0.03 โดยน้ำหนักของน้ำ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.28 มีค่าการไหลแผ่ที่น้อยกว่า และการใส่สารผสมเพิ่ม HPMC ที่ปริมาณ 0.01% (W400-28-H01) มีค่าการไหลแผ่ที่ 60 มม. ซึ่งมีค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างทั้งหมด



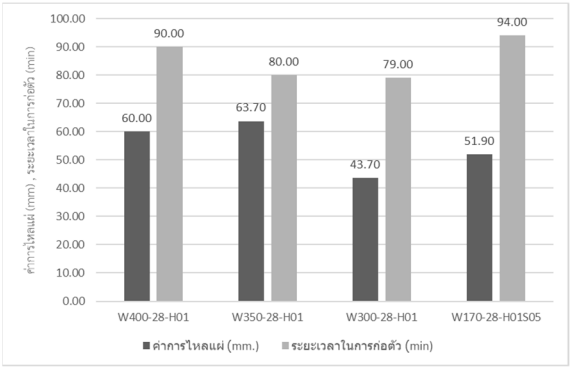
รูปที่ 4 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่น้ำ 400 กก./ลบ.ม.

จากรูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้ปริมาณน้ำที่ 400 กก./ลบ.ม ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.28 และ 0.30 โดยส่วนผสมของมอร์ตาร์มีส่วนผสมของสารเคมีผสมเพิ่ม HPMC และ Starch Ether ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.01 และ 0.03 โดยน้ำหนักของน้ำ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่ 0.28 มีระยะเวลาในการก่อตัวที่เร็วที่สุด ที่ 85 นาที และการใส่สารผสมเพิ่ม HPMC ส่งผลให้มอร์ตาร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่เร็วกว่าการใส่สาร Starch Ether



รูปที่ 5 ระยะเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่น้ำ 400 กก./ลบ.ม.

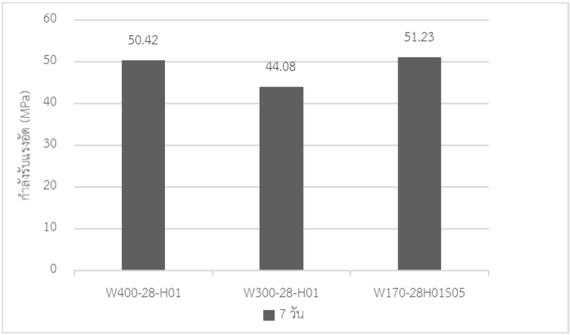
จากการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีการใส่ HPMC เป็นสารผสมเพิ่มมีค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาในการก่อตัวที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีการใส่ Starch Ether ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกส่วนผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่ต่ำคือตัวอย่าง W400-28-H01 ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.28 และมีการใส่สารผสมเพิ่มคือ HPMC ปริมาณ 0.01% ต่อน้ำหนักของน้ำ และได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยการเลือกใช้ปริมาณน้ำต่อมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร ดังนี้ 400 กก./ลบ.ม., 350 กก./ลบ.ม., 300 กก./ลบ.ม. และ 170 กก./ลบ.ม. ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ค่าการไหลแผ่และระยะเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรแตกต่างกัน

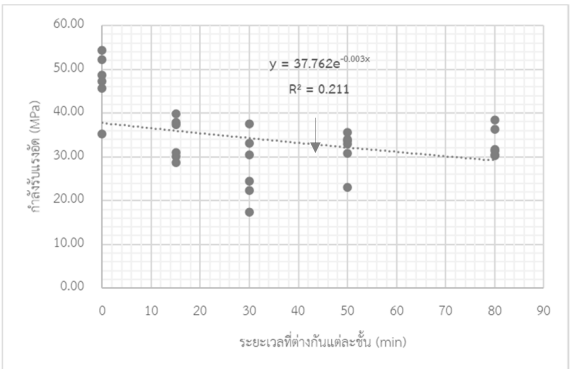
3.3. การทดสอบมอร์ตาร์ในสภาวะแข็ง (HARDENED STATE)

จากรูปที่ 7 ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อใช้ในการกดทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 7 วัน โดยทำการเลือกตัวอย่างที่มีค่าการไหลต่ำมาพิจารณาเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ ปริมาณน้ำที่ 400 กก./ลบ.ม. ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง W400-28-H01 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 50.42 MPa และ ตัวอย่าง W170- 28-H01-S5 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 51.23 MPa ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรแตกต่างกัน

จากรูปที่ 8 ผู้วิจัยได้ทำการเลือกตัวอย่างส่วนผสมมอร์ตาร์ W400-28-H01 มาทำการฉีดขึ้นรูป โดยกำหนดระยะเวลาในการฉีดขึ้นรูปที่แตกต่างต่างกันที่ 0 15 30 50 และ 80 นาที หลังจากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน จึงนำมาทดสอบหากำลังในการรับแรงอัด ซึ่งผลการทดสอบกำลังในการรับแรงอัดเฉลี่ยที่ระยะเวลาในการฉีดขึ้นรูปที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น คือ 47.26 , 34.16 , 27.56 , 31.68 , 33.11 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังในการรับแรงอัดที่ระยะเวลาฉีดขึ้นรูปที่แตกต่างกันที่ 0 นาที มีค่ามากที่สุด แต่ตัวอย่างแต่ละชั้นนั้นยังไม่สามารถรับน้ำหนักของชั้นถัดไปได้อย่างสมบูรณ์ และระยะเวลาในการฉีดแต่ละชั้นที่มากขึ้นจะมีแนวโน้มของกำลังในการรับแรงอัดที่ลดลง



รูปที่ 8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ W400-28-H01 ที่มีระยะเวลาในการขึ้นรูปแตกต่างกัน

4. สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้มีความเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกการปรับปรุงส่วนผสมของมอร์ตาร์ในการฉีดขึ้นรูปโครงสร้างแทนที่วัสดุคอนกรีต จึงได้ทำการออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัดที่สูง (High strength mortar) ในการออกแบบและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเฉพาะคุณสมบัติค่าการไหลแผ่และระยะเวลาก่อ ตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากต้องการศึกษาผลของการไหลแผ่และระยะเวลาในการก่อตัวก่อนเพื่อจำแนกตัวอย่างที่สนใจ โดยกำหนดให้ค่าการไหลแผ่ที่สนใจอยู่ในช่วง 40-60 มิลลิเมตรซึ่งเป็นค่าที่แนะนำสำหรับการฉีดขึ้นรูปมอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ทำการคัดเลือกมาทดสอบกำลังอัดของ ตัวอย่างวัสดุมอร์ตาร์เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุมีกำลังรับแรงที่มากเพียงพอต่อการก่อสร้าง โดยที่ผู้วิจัยได้กำหนดค่ากำลังอัดที่ต้องการคือ 50 mPa ที่อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัย ได้ทำการคัดเลือกตัวอย่างส่วนผสมมอร์ตาร์ W400-28-H01 ที่มีค่าการไหลแผ่ที่ 60 มม.ระยะเวลาในการก่อตัว 90 นาที และกำลังในการรับแรงอัดที่ 7 วันอยู่ที่ 50.42 mPa และตัวอย่างส่วนผสม W170-28-H01S5 ที่มีค่าการไหลแผ่ 51.9 มม.ระยะเวลาการก่อตัว 94 นาที และกำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ที่ 51.23 MPa ซึ่งมีการใช้สารลดน้ำSuperplasticizer ในการปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์โดยเป็นการช่วยลดปริมาณในการใช้น้ำและปูนซีเมนต์ลงเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในอนาคต อีกทั้งผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการทดสอบกำลังในการรับแรงอัดของวัสดุสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่คำนึงถึงกำลังในการยึดเกาะกันระหว่างชั้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปนานจะทำให้เกิด cold joint ซึ่งส่งผลให้กำลังในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นกล่าวได้ว่าระยะเวลาในการขึ้นรูปที่ห่างกัน 0 นาที มีค่ากำลังอัดที่สูงแต่วัสดุไม่สามารถรับน้ำหนักของตัวเองได้ หลังจากผ่านไป 15 นาที วัสดุจะเริ่มสามารถรับน้ำหนักของชั้นถัดไปได้แต่กำลังในการรับแรงจะลดลง แต่เมื่อสังเกตที่ระยะเวลาในการฉีดระหว่างชั้นที่ 50 นาที กำลังในการรับแรงอัดจะกลับมาสูงขึ้นเนื่องจากวัสดุมอร์ตาร์สดจะเริ่มมีการดูดความชื้นเข้ามาทำปฏิกิริยาทำให้ชั้นล่างจะมีความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้นแต่ชั้นบนจะเกิดการแห้งของผิวทำให้มีลักษณะเป็นรอยแตกร้าวเกิดขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. การอ้างอิง

[1] Y.W.D. Tay, B. Panda, S.C. Paul, N.A. Noor Mohamed, M.J. Tan, K.F. Leong. (2017). 3D printing trends in building and construction industry. Virtual and Physical Prototyping 12(3),$DOI :10.1080/1745275

[2] Prasittisopin,L.,Jiramarootapong,P.,Pongpaisanseree, K., and Snguanyat, C. (2019). Lean manufacturing and thermal enhancement of single-layer wall with an additive manufacturing (AM) structure, ZKG Intern.

[3] R.A. Buswella, , W.R. Leal de Silvab , S.Z. Jonesc , J. Dirrenbergerd, 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Cement and Concrete Research. 112 (2018) 37-49.

[4] Shaodan Hou , Zhenhua Duan a , Jianzhuang Xiao , Jun Ye c. (2020). A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design , Construction and Building Materials.

[5] T. Le, S. Austin, S. Lim, R. Buswell, A. Gibb, T. Thorpe. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Mater. Struct. 45.

[6] T. Le, S. Austin, S. Lim, R. Buswell, R. Law, A. Gibb, T. Thorpe. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete, Cem. Concr. Res. 42.

[7] Chen, N., Wang, P., Zhao, L., & Zhang, G. (2020). Water Retention Mechanism of HPMC in Cement. Materials, 13(13), 2918. doi:10.3390/ma13132918

[8] Glatthor, A. (2016). Performance of Starch Ethers in Drymix Mortars. Retrieved November 20, 2020.

[9] Tan H. et al.(2018). Effect of hydroxypropyl-methyl cellulose ether on rheology of cement paste plasticized by polycarboxylate superplasticizer. Construction and Building Materials, 160, 341-350. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.010

[10] วรกร ศรีพิพัฒน์, วิชิตพงศ์ สหัสสพล, วิชชุพันธ์ ลือพงศ์ไพจิตร , วรัญญา เจริญยิ่ง. (2563). การก่อสร้างสมัยใหม่ด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต). สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.

[11] B. Panda, S. Chandra Paul, N. Ahamed Noor Mohamed, Y. Wei Daniel Tay, M. Jen Tan. (2017) Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar doi : 10.1016/j.measurement.2017.08.051